

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОДЫ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА ТАВАТУЙ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ (ИСП-МС)

Д.В. Пирогов, В.М. Голик, Т.А. Кисель
Уральский электрохимический комбинат (УЭХК), ЦЗЛ
Россия, 624130, Новоуральск Свердловской обл., Дзержинского 2
e-mail: victz@ricon.e-burg.ru

Поступила в редакцию 17 мая 2001 г.

Метод масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в сочетании с высокоэффективной микроволновой подготовкой использован для определения содержания загрязняющих веществ в воде и донных отложениях озера Таватуй, которое считается "жемчужиной" среднего Урала. По результатам анализа 28 проб, отобранных в 2000 году, количественно определено содержание 30 химических элементов в водах и 19 в донных отложениях. Большинство полученных значений установлены впервые. В этих же условиях проведён анализ трёх проб воды озера Байкал. Проведено сравнение полученных данных с ранее опубликованными и показано, что содержание большинства элементов в воде озера Таватуй соответствует диапазону концентраций незагрязнённых пресных озёр и рек мира и отражает природный гидрохимический фон.

Пирогов Дмитрий Владимирович – инженер-спектрокопист Уральского электрохимического комбината.

Область научных интересов: масс-спектрометрия с ИСП, атомная и атомно-абсорбционная спектрометрия, применительно к анализу объектов окружающей среды и биологических объектов.

Голик Василий Михайлович – зам. начальника ЦЗЛ Уральского электрохимического комбината, кандидат технических наук.

Область научных интересов: аналитичес-

кая химия высокочистых веществ, урановых материалов и объектов окружающей среды, физико-химические методы анализа.

Кисель Татьяна Ароновна – руководитель группы спектральных методов анализа ЦЗЛ Уральского электрохимического комбината.

Область научных интересов: спектральные и химико-спектральные методы определения низких содержаний элементов в урановых материалах и объектах окружающей среды.

Горное озеро Таватуй называют жемчужиной среди горных озёр Свердловской области. Оно расположено в 50 км северо-западной Екатеринбурга, занимает площадь 21,2 км² и является гидрологическим и ботаническим памятником природы республиканского значения [1]. Возраст озера около 10 тысяч лет. На берегу озера расположены посёлки Калиново. Приозёрный (Шаманиха) и село Таватуй с общей численностью проживающих около 4500 человек. Кроме того, на берегу озера расположены Калиновский хими-

ческий и Невьянский рыбный заводы, подсобные хозяйства и базы отдыха. Озеро служит местом массового отдыха и в настоящее время всё ощущает на себе антропогенное воздействие. В основном, это смыл с водосборной площади вредных веществ, связанных с пребыванием большого количества людей и распахкой земель, свалки мусора, бытовых и пищевых отходов по берегам и отходы производства, попадающие в озеро [2].

Таватуй является не только источником пить-

евой воды, но и относятся к категории рыбо-хозяйственных водоёмов. Это означает, что содержание загрязняющих веществ в нём нормируется ещё более жёстко, чем в питьевой воде. В списке приоритетных потенциальных загрязняющих веществ озера одно из первых мест занимают тяжёлые металлы и некоторые неметаллы. Попадающие в водоём различными путями, они участвуют в процессах гидролиза, сорбции и десорбции, комплексообразования, осаждения. Благодаря этому химические элементы меняют форму существования, переходят в донные отложения (ДО), осаждаются в виде труднорастворимых соединений, вновь переходят в водную фазу [3].

Результаты анализа воды и ДО представляют собой источник важной информации о состоянии озера и оценки влияния на здоровье человека и могут служить основой для решения научных и практических задач по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) в связи с деятельностью предприятий. В настоящее время в химико-аналитической лаборатории ЦЗЛ УЭХК разработаны методики ИСП-МС определения 30-ти элементов в воде и 19-ти в ДО, многие из которых никогда количественно ранее не определялись в природных объектах Уральского региона. Для получения наиболее полной информации о состоянии водоемов, расположенных в окрестностях города Новоуральска и в том числе озера Таватуй, в период с мая по октябрь 2000 года был проведён отбор и анализ проб воды и ДО по специальной программе.

Цель данной работы – применение ИСП-МС метода анализа в сочетании с высокочувствительной микроволновой подготовкой проб для количественного определения содержания большого перечня химических элементов в водах и донных отложениях озера Таватуй.

Отбор и подготовка проб к анализу

Отбор проб является важным этапом микро-элементного анализа природных объектов. Непредставительный пробоотбор, а так же загрязнения (или потери примесей) в процессе хранения и пробоподготовки служат основными источниками погрешности при выполнении измерений. В данной работе основной принцип, который соблюдался при отборе и подготовке проб водных объектов – минимум операций и минимум реактивов до выполнения измерений.

Пробы воды и ДО отбирали с мая по сентябрь (включительно) 2000 года с периодичностью в среднем один раз в 10 дней для воды и один раз в месяц для ДО. Отбор проб выполняли в южной и север-

ной частях озера. Всего отобрано 20 проб воды и 8 проб ДО. Пробы воды отбирали без фильтрования согласно [4]. Этот способ отбора не исключает влияния на элементный состав пробы некоторого количества планктона и взвешенных частиц, всегда присутствующих в природной воде. Однако он более представительен, т.к. при предварительном фильтровании можно, с одной стороны, потерять часть элементов, находящихся в воде в виде взвесей и коллоидов, а с другой стороны, внести загрязнения от дополнительной операции.

Водозабор в озере Таватуй осуществляли из глубинного горизонта озера на расстоянии около 500 м от берега, где водные массы наиболее стабильны по составу. Поскольку используемый для элементного анализа ИСП-МС метод, благодаря высокой чувствительности, позволяет определять чрезвычайно низкие концентрации элементов (до $n \cdot 10^{-7}$ мг/дм³) [5], то дальнейшая подготовка проб воды заключалась лишь в консервировании отобранных проб минимальным количеством концентрированной азотной кислоты (1 см³ на 1 дм³ пробы). Таким образом, элементный состав проб воды характеризовали кислоторастворимыми формами определяемых химических элементов.

Образцы ДО отбирали, по возможности, в тех же точках, что и пробы воды. Отбор осуществляли приспособлением в форме цилиндра на штанге с открывающейся боковой стенкой. В процессе отбора ДО перемешивались и послойный анализ, как и оценка динамики накопления загрязняющих веществ не проводились. Условия подготовки проб ДО подробно изложены в [6].

Определение элементного состава проб воды

ИСП-МС метод является чрезвычайно информативным при определении содержания химического состава природных объектов благодаря возможности многоэлементного анализа, высокой чувствительности и широкому диапазону определяемых концентраций. Пределы обнаружения ИСП-МС метода изменяются в интервале от $n \cdot 10^{-7}$ до $n \cdot 10^{-4}$ мг/дм³, что позволяет одновременно количественно определить до 40 элементов в различных водных объектах без какой-либо предварительной химической подготовки. Разработанная в ЦЗЛ УЭХК аттестованная методика ИСП-МС анализа природных вод [7], позволяет определять практически все контролируемые на сегодняшний день в воде элементы на уровне ПДК, установленных ГОСТ 2874-82 [8] и Сан. Пин. 2.1.4.559 [9] (табл. 1).

Таблица 1

Результаты полуколичественного ИСП-МС определения химических элементов в воде озера Таватуй в сравнении с диапазонами определяемых концентраций методики ИП 16.566-98 и значениями ПДК, мкг/дм³

Элемент	Ориентировочная массовая концентрация в озере Таватуй (полуколичественное определение в режиме TQ)	Диапазон определяемых массовых концентраций по методике ИП 16.566-98 [7]	Нормативы (ПДК) [8, 9], не более		
			Питьевая вода	Вода водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования	Вода водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей (не морских)
Al	30	5 – 500	500	500	-
Ba	20	50 – 5000	100	100	-
Be	0,005	0,1 – 10	0,2	1	0,3
B	9	50 – 5000	500	500	100 (аморфный)
Fe	70	50 – 5000	300	300	5 (Fe ²⁺)
Cd	0,04	0,5 – 500	1	1	5
K	2000	500 - 50000	-	-	10000 к природному естественному фону
Ca	16000	5000 - 50000	-	-	180000
Co	0,08	1 – 500	100	100	10
Mg	4000	500 – 10000	-	-	50000
Mn	10	1 – 500	100	100	10 (Mn ²⁺)
Cu	2	5 – 500	1000	1000	1 к природному естественному фону
Mo	1	5 – 500	250	250	1,2 к природному естественному фону
As	2	1 – 500	50	50	50
Na	5000	500 - 50000	200000	200000	120000
Ni	2	1 – 500	100	100	10
Hg	0,02	0,05 – 5	0,5	0,5	отсутствие (0,01 Hg ²⁺)
Pb	2	1 – 500	30	30	100 (Pb ²⁺)
Se	2	5 – 500	10	10	1,6 к природному естественному фону
Sr	100	500 – 50000	7000	-	-
Cr	0,8	5 – 500	50	50 (Cr ⁶⁺)	20 (Cr ⁶⁺)
Zn	10	5 – 500	5000	1000	10

прочерк означает отсутствие норматива

Однако, предварительное полуколичественное исследование состава воды озера Таватуй на масс-спектрометре ELAN 6000 в полуколичественном режиме измерения Total Quant (TQ) [5] показало, что реальные содержания ряда элементов, таких как Ba, Be, B, Cd, Co, Mo, Ni, Pb, в этом водоёме находятся на уровнях значительно ниже ПДК и, в некоторых случаях, нижней границы определяемых концентраций используемой методики (табл. 1). Поэтому в данной работе были использованы специальные приёмы пробоподготовки, позволившие снизить пределы обнаружения методики и получить достоверные результа-

ты реального содержания этих элементов, а также содержания U, Tl, Te, Bi, W, V, Sb и Li, не включённых в методику [7]. Это, прежде всего, применение заведомо чистых пластиковых пробоотборных флаконов, используемых только для одной точки отбора; исключение моющих средств, кислот и прочих реактивов для мытья пробоотборных флаконов; использование для подготовки проб кислоты, прошедшей предварительную очистку методом дистилляции без кипения. Кроме того, все измерения выполняли на масс-спектрометре, который не использовали для анализа проб с высоким содержанием примесей. Измерения

проб проводили на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой "Elan 6000" производства фирмы "Perkin-Elmer Sciex". Инструментальные параметры: мощность ИСП разряда – 1000 Вт, распылитель – поперечно-поточный, режим работы детектора – двойной, измерение на пике (без сканирования) с использованием режима автоматического изменения напряжения на ионной линзе (AutoLens), общее время измерения пробы – около 5 минут. Выбор изотопов элементов для измерений осуществляли с учётом возможных спектральных наложений.

Растворы сравнения готовили на основе слабокислой деионизованной воды с рН, равным рН растворов проб, на основе Государственных стандартных образцов отдельных элементов. Очистку воды проводили на установке "Elgastat Maxima" фирмы "Elga Ltd", очистку кислот осуществляли методом дистилляции без кипения на установке фирмы "Milestone". Концентрации элементов в головном градуировочном растворе, были установлены в соотношении, близком к типичному составу вод исследуемого региона (табл. 2). Рабочие растворы сравнения готовили разбавлением головного градуировочного раствора.

Таблица 2

Массовые концентрации элементов в головном градуировочном растворе

Элемент	Массовая концентрация в головном градуировочном растворе, мкг/дм ³
Na, Mg, K, Ca, Sr	10 000
Fe, Ba, B	1000
Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Al, Mo, Se, V, Te, Tl, W, Bi, Li, Sb	100
Be, Hg, U, Cd	1

Кроме того, в рамках совместной работы по изучению состава Байкальской воды, в этих же условиях нами был проведён анализ трёх образцов воды озера Байкал, отобранных специалистами Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск).

Средние результаты количественного определения содержания элементов в воде озера Таватуй за период наблюдения, а так же их минимальные, максимальные значения и значения относительного стандартного отклонения (ОСО) за период отбора приведены в табл. 3.

Анализ полученных данных показал, что кон-

центрации ряда элементов в водах южной и северной части озера Таватуй имеют значительные колебания за период отбора. Это относится прежде всего к содержанию Al, Те, Тl, W, Zn, Be, Bi, Co, Cr, Sb и Se, у которых ОСО результатов составило более 100 % за период наблюдения. Мы не относим эти колебания к сезонным, т.к. период наблюдения за сезонными изменениями явно недостаточен. Кроме того, гидрохимические характеристики водоёмов, обладающих значительной водной массой, каким является озеро Таватуй, должны быть относительно стабильны во времени, тогда как химический состав речного стока может претерпевать существенные годовые колебания. Значительный разброс в содержании ряда элементов в озере за период отбора (Те, Тl, W, Be, Bi, Co, Se) можно объяснить их чрезвычайно низкими концентрациями и, следовательно, большой погрешностью проведения отбора и анализа. Необходимо сказать и о небольшой статистической выборке результатов, т.к. отбор проб вод проводили в среднем 1 раз в 10 дней и только в один флакон, т.е. без параллельных отборов.

Результаты определения содержания химических элементов в озере Таватуй были сопоставлены с кларком гидросферы [10], [11], а так же с литературными данными о содержании аналогичных элементов в воде озера Байкал [12], [13], [14], [15] (табл. 4). В этой же таблице приведены данные о содержании элементов в незагрязнённых пресных озёрах и реках мира [16].

Приведённые данные свидетельствуют о достаточной чистоте воды озера Таватуй – концентрации большинства элементов, приведённых в табл. 4, занимают промежуточное положение между кларками речных и морских вод (за исключением Fe, Mn, Zn и As). Однако, Таватуй значительно уступает Байкалу – содержание почти всех найденных элементов (кроме Ca, Sr, Al, Mo, Bi, U) в воде озера Таватуй выше. Тем не менее гидрохимические характеристики этого водоёма можно использовать как фоновые для нашего региона, т.к. окрестности озера Таватуй испытывают значительно меньшую техногенную нагрузку, чем соседние Верх-Нейвинское и Нейво-Рудянское водохранилища. Содержание всех определённых элементов в воде озера Таватуй не превышает нормативов – ПДК питьевой воды, ПДК воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и ПДК воды водных объектов, используемых для рыбохозяйственных целей. Повышенное, по отношению к Байкалу, содержание Fe и Mn в воде озера Таватуй, скорее всего, не имеет техногенного ха-

рактера, и связано с геохимическими особенностями расположения озера и не наносит вреда

экосистеме, что подтверждается данными элементного анализа соседних озёр и рек.

Таблица 3

Результаты ИСП-МС определения содержания химических элементов в воде озера Таватуй за период отбора

Элемент	Южная часть оз. Таватуй				Северная часть оз. Таватуй				Среднее по оз. Таватуй	
	$C_{\text{ср}}'$ мкг/дм ³	$C_{\text{мин}}'$ мкг/дм ³	$C_{\text{макс}}'$ мкг/дм ³	S_r , %	$C_{\text{ср}}'$ мкг/дм ³	$C_{\text{мин}}'$ мкг/дм ³	$C_{\text{макс}}'$ мкг/дм ³	S_r , %	$C_{\text{ср}}'$ мкг/дм ³	$S_{r \text{ рез}}'$, % мкг/дм ³
Ca	9500	7700	12000	14	10000	7000	13000	20	9800	3,8
Na	5600	4300	8000	21	6000	3900	7600	22	5800	4,1
Mg	3900	2700	5200	22	4300	2500	6800	29	4100	8,2
K	2300	1900	3200	16	2500	1600	3700	21	2400	3,6
Fe	180	64	390	60	160	12	500	87	170	7,3
Sr	99	58	140	25	100	62	130	24	100	2,6
Al	52	1,4	250	150	31	1,0	180	180	42	36
Mn	37	17	64	50	27	6,5	62	68	32	22
Ba	17	14	24	21	17	13	23	17	17	1,2
B	16	6,6	25	37	17	5,5	32	45	17	4,9
Zn	4,4	1,1	15	100	3,3	0,59	6,9	67	3,9	20
As	3,0	1,0	6,6	66	2,9	0,10	6,5	69	2,9	2,1
Cu	1,9	1,1	3,6	42	2,1	0,22	5,6	75	2,0	6,2
Sb	1,6	0,36	2,8	53	1,7	0,31	7,3	120	1,6	7,3
Ni	1,1	0,10	1,6	39	1,6	0,10	3,5	56	1,4	29
Li	1,1	0,74	1,2	18	1,1	0,74	1,4	18	1,0	3,1
Cr	0,81	0,49	1,9	56	1,1	0,43	5,0	130	0,97	23
W	0,68	0,053	2,6	110	0,54	0,085	1,7	97	0,61	17
Pb	0,54	0,062	1,4	83	0,37	0,10	1,1	79	0,44	23
Se	0,44	0,10	1,2	73	0,44	0,083	1,7	110	0,44	1,0
V	0,43	0,10	1,2	72	0,54	0,10	1,3	62	0,49	16
Co	0,29	0,15	0,44	32	0,32	0,051	1,3	114	0,30	5,6
Mo	0,19	0,13	0,23	19	0,25	0,11	0,48	50	0,22	20
Cd	0,019	0,0070	0,038	48	0,029	0,0050	0,081	90	0,024	28
Bi	0,061	0,0060	0,17	90	0,068	0,010	0,23	110	0,064	7,4
Te	0,043	0,0080	0,17	110	0,040	0,0090	0,13	83	0,042	5,3
Hg	0,019	0,0050	0,040	65	0,021	0,0060	0,042	52	0,020	8,3
П	0,012	0,0020	0,035	100	0,016	0,0050	0,055	100	0,014	19
Be	0,0031	0,0010	0,0070	65	0,0047	0,0010	0,015	100	0,0039	29
U	0,011	0,0078	0,020	31	0,0094	0,0066	0,018	35	0,010	13

$C_{\text{ср}}$ - массовая концентрация элемента;

$C_{\text{мин}}$ - минимальное значение массовой концентрации элемента за период отбора;

$C_{\text{макс}}$ - максимальное значение массовой концентрации элемента за период отбора;

S_r - относительное стандартное отклонение значений массовой концентрации элемента за период отбора ($n=10$);

$S_{r \text{ рез}}$ - относительное стандартное отклонение результатов определения значений массовой концентрации элемента в различных точках отбора ($n=2$)

Определение элементного состава проб донных отложений

Поступающие в водную массу водоёмов химические элементы выводятся из них двумя путями:

с водным стоком вытекающих рек и (или) вместе с оседающими частицами взвеси в ДО. При изменении физико-химических условий в водоёме элементы из ДО могут вновь поступать в водную мас-

су [17]. Кроме того, при взаимодействии с органическими веществами, присутствующими в водоёме, могут образовываться чрезвычайно токсичные формы соединений тяжёлых металлов (например метилртуть). Опасность высокого загряз-

нения ДО заключается ещё и в том, что водные организмы и рыбы проводят большую часть своего жизненного цикла на поверхности или внутри ДО и, тем самым, накапливают ЗВ, которые по пищевой цепи могут поступать в организм человека.

Таблица 4

Сравнение концентраций элементов в озерах Таватуй и Байкал с литературными данными и с данными о фоновых уровнях гидросферы

Элемент	Массовая концентрация, мкг/дм ³					
	Озеро Таватуй, наши результаты	Озеро Байкал		Кларк гидросферы [10], [11]		Незагрязнённые пресные озёра и реки мира [16]
		Литературные данные Ветрова В.И. [12], Матвеева А.А. [13] и Эпова В.Н. [14], [15]	Наши результаты	Речные воды	Морские воды	
Ca	9800	16000 [14]	13000	-	-	-
Na	5800	3000 [14]	3300	-	-	-
Mg	4100	2200 [14]	3300	-	-	-
K	2400	920 [14]	980	-	-	-
Fe	170	30 [12], 5 [13]	3,8	40	5	3-1560
Sr	100	113 [14]	120	50	7600	21-480
Al	42	3,0 [15]	0,37	50	1	10-7900
Mn	32	0,42 [15]	0,25	10	0,1	0,4-1700
Ba	17	10 [15]	7,9	20	14	6-60
B	17	9,9 [15]	4,9	-	-	-
Zn	3,9	2,6 [15]	1,1	2	0,4	0,002-4840
As	2,9	0,3 [12]	0,57	2	2	0,02-40
Cu	2,0	0,93 [15]	0,32	7	0,3	0,01-400
Sb	1,6	0,17 [12]	0,20	0,07	0,003	0,02-670
Ni	1,4	0,51 [12]	0,67	0,5	0,5	0,8-135
Li	1,0	2,0 [15]	1,4	-	-	-
Cr	0,97	0,53 [12]	0,22	1	0,25	0,1-500
W	0,61	-	0,27	-	-	-
Pb	0,44	0,45 [12]	0,16	1	0,002	0,02-5000
Se	0,44	0,060 [12]	0,010	0,2	0,1	0,02-1800
V	0,49	0,46 [12]	0,37	1	2	0,16-19
Co	0,30	0,047 [12]	0,065	0,1	0,002	0,06-20
Mo	0,22	1,3 [15]	1,3	1	10	0,2-10,5
Cd	0,024	0,0084 [15]	0,0078	0,01	0,07	-
Bi	0,064	-	0,10	-	-	-
Te	0,042	-	0,010	-	-	-
Hg	0,020	0,005 [12]	0,010	1	0,002	0,02-5000
Tl	0,014	-	0,0001	-	-	-
Be	0,0039	-	0,002	-	-	-
U	0,010	0,50 [15]	0,52	0,4	3	0,0013-1,14

прочерк означает отсутствие данных

В ДО химические элементы представлены в различных формах: в нерастворимых продуктах

химического выветривания горных пород и минералов, адсорбированные на поверхности окси-

дов Fe и Mn, глинистых минералов и органических материалов и т.д. Для определения форм нахождения химических элементов в ДО наиболее часто используют методики последовательных экстракций. К недостаткам этих методик относятся существенные потери вещества при промывке образцов между отдельными стадиями экстракции и невысокая степень селективности для различных форм элементов. В [18] отмечено, что в последнее время для определения степени подвижности и токсичности элементов часто используют только один реагент, например ацетат аммония. В [19] ацетатно-аммонийная вытяжка предлагается не только как селективно выщелачивающая формы металлов, оказывающие воздействие на наземные растения, но и как одна из методик определения воздействия на гидробионты токсичных форм металлов, накопленных в ДО. В настоящей работе экстракцию подвижных форм элементов в ДО проводили ацетатно-аммонийным раствором с pH = 4,8.

Отобранные образцы ДО высушивали при температуре не выше 80 °С (для уменьшения потерь легколетучих элементов) по [6]. После гомогенизации и получения средней пробы навески массой 0,5 г разлагали в микроволновой печи Anton Paar GmbH (Perkin-Elmer) в смеси очищенных концентрированных кислот – азотной и соляной при температуре 230 – 250 °С [20]. Очистку кислот и воды осуществляли так же, как и при анализе воды. Для определения содержания подвижных форм элементов проводили экстракцию ацетатно-аммонийным раствором из навески проб мас-

сой 5 г в течение 24 часов. Перед измерением полученные растворы разбавляли водой и отстаивали. Измерения выполняли по разработанной нами методике [20]. Отличительными особенностями при проведении измерений проб ДО от анализа проб воды явилось увеличенная мощность ИСП разряда (1300 Вт) и использование внутреннего стандарта, в качестве которого применили Rh. Определение подвижных форм элементов проводили по градуировочным образцам, приготовленным на основе ацетатно-аммонийного раствора.

Результаты количественного определения 19 элементов за период наблюдения, а также средние, минимальные, максимальные значения, доли подвижных форм и значения относительного стандартного отклонения за период отбора для всех определяемых элементов приведены в табл.5. Большая часть химических элементов определена в донных отложениях озера Таватуй впервые.

Необходимо отметить, что полученные нами результаты анализа ДО имеют значительные расхождения за период отбора (особенно по Fe, V, Sb, Mo, Hg, U). Они могут быть связаны как с погрешностями пробоотбора, так и со значительной неоднородностью самих ДО. Даже для такого "старого" и глубоководного озера как Байкал при отборе ДО с помощью поршневой трубки с фиксированной глубиной захвата, средние концентрации отдельных элементов в ДО различных частей озера могут различаться в 2 – 5 раз [12]. Для выяснения причин расхождений результатов необходимы дополнительные исследования.

Таблица 5

Результаты ИСП-МС определения содержания химических элементов в ДО озера Таватуй за период отбора

Элемент	Южная часть оз. Таватуй				Северная часть оз. Таватуй				Среднее по оз. Таватуй		
	C _{ср} , мг/кг	C _{мин} , мг/кг	C _{макс} , мг/кг	S _r , %	C _{ср} , мг/кг	C _{мин} , мг/кг	C _{макс} , мг/кг	S _r , %	C _{ср} , мг/кг	S _{г сумм} , %	Доля подвиж. форм, %
Fe	10000	680	17000	74	2800	1080	7300	100	6600	81	10
Mn	220	110	270	35	170	67	300	59	190	18	79
Ba	150	110	190	25	59	28	92	53	100	61	22
Zn	110	90	120	12	45	19	69	56	77	59	44
Cu	69	65	76	7,1	34	11	69	82	51	48	3,0
Sr	67	45	99	38	67	32	130	69	67	0,47	61
V	48	31	65	37	9,2	1,1	25	120	28	96	2,0
Pb	39	26	51	31	24	9,2	56	91	31	34	24
Ni	21	16	25	20	16	6,2	26	60	19	20	20
Cr	20	13	28	37	14	6,7	24	56	17	26	2,0
As	14	9,1	23	44	8,7	1,4	17	91	12	35	30
Co	12	7,5	16	29	8,5	2,3	13	53	10	27	30

Окончание табл. 5

Элемент	Южная часть оз. Таватуй				Северная часть оз. Таватуй				Среднее по оз. Таватуй		
	C_{cp}' мг/кг	$C_{мин}'$ мг/кг	$C_{макс}'$ мг/кг	$S_r, \%$	C_{cp}' мг/кг	$C_{мин}'$ мг/кг	$C_{макс}'$ мг/кг	$S_r, \%$	C_{cp}' мг/кг	$S_{г\text{ сумм}}'$ %	Доля подвиж. форм, %
Sb	1,3	0,70	2,1	51	2,2	0,24	5,1	100	1,7	36	31
Se	1,2	0,50	2,0	69	0,72	0,55	0,91	22	0,98	37	6,0
Cd	1,2	0,78	1,9	44	0,32	0,13	0,63	68	0,77	82	57
Mo	0,98	0,71	1,3	31	0,66	0,31	1,7	100	0,82	28	< 0,5
Hg	0,80	0,21	2,3	120	1,6	1,2	2,1	24	1,2	45	< 0,5
Be	0,23	0,17	0,29	26	0,050	0,023	0,11	80	0,14	91	20
U	0,80	0,73	0,96	14	0,096	0,054	0,19	63	0,45	110	32

C_{cp} - массовая концентрация элемента;

$C_{мин}$ - минимальное значение массовой концентрации элемента за период отбора;

$C_{макс}$ - максимальное значение массовой концентрации элемента за период отбора;

S_r - относительное стандартное отклонение значений массовой концентрации элемента за период отбора ($n=4$);

$S_{г\text{ рез}}$ - относительное стандартное отклонение результатов определения значений массовой концентрации элемента в различных точках отбора ($n=2$)

В табл.6 приведены средние результаты анализа ДО озера Таватуй, а также литературные данные о химическом составе ДО озера Байкал.

Таблица 6

Сравнительные данные элементного состава ДО озера Таватуй с литературными данными о химическом составе глубоководных ДО озера Байкал

Элемент	Массовая концентрация, мг/кг	
	Озеро Таватуй, наши результаты	Озеро Байкал [12], [21]
Fe	6600	48000 [21]
Mn	190	400-5000 [21]
Ba	100	750 [21]
Zn	77	80 [21]
Cu	51	45 [21]
Sr	67	150 [21]
V	28	150 [21]
Pb	31	21 [21]
Ni	19	50 [21]
Cr	17	110 [21]
As	12	-
Co	10	16 [21]
Sb	1,7	0,4 [21]
Se	0,98	-
Cd	0,77	0,4 [21]
Mo	0,82	3,2 [21]
Hg	1,2	0,066 [21]
Be	0,14	-
U	0,45	11 [21], [12]

прочерк означает отсутствие данных

За исключением Cu, Pb, Sb, Cd и Hg содержание остальных элементов в донных отложениях озера Таватуй оказалось даже ниже, чем в озере Байкал, что ещё раз подтверждает уникальность озера Таватуй и необходимость проведения исследований по его изучению и защите от загрязнений. Заметим, что концентрация урана в ДО озера Байкал примерно в 20 раз выше, чем в ДО озера Таватуй (табл. 6), а в воде в 50 раз выше (табл.4), что может быть следствием региональной геохимической аномалии [12].

Наибольшая доля подвижных форм химических элементов в ДО (более 50 %) характерна для Mn, Sr и Cd (табл.5). Из всех исследуемых элементов Mn имеет наибольшую долю подвижных форм (79%). Это подтверждает вывод о невысоких показателях степени его вовлечения в комплексные соединения [18] и способности ассоциировать с органическими соединениями [22]. Высокое значение доли подвижных форм в ДО найдено для такого токсичного элемента как кадмий (57%). Причём высокая подвижность кадмия характерна и для почв. Железо, содержание которого в ДО самое высокое из исследуемых элементов, обладает высокой комплексообразующей способностью с органическими лигандами [22] и доля его подвижных форм в ДО относительно небольшая (10%).

Характерная особенность поведения Cu в природных водах – ярко выраженная её способность сорбироваться на взвешенных веществах и частицах ДО путём адсорбции на поверхности гидроксидов Mn и Fe, ионного обмена с глинистыми минералами, взаимодействия с высокомолекулярными органическими соединениями [18]. Поэтому Cu характеризуется как слабоподвиж-

ный элемент [22]. Отмечается высокая степень (до 99%) вовлечения Си в процессы комплексообразования с органическим материалом в ДО водоёмов [18]. Малая величина найденного значения доли подвижных форм меди в озере Таватуй

(3%) подтверждает это утверждение.

Авторы благодарят Никифорову Г.П., Ромашову Н.С., Васильеву С.Ф., Кузьмину Н.П. и Свечникову С.В. за помощь в проведении химических анализов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галактионов С.А. Озёра Урала. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1990. 117 с.
2. Архипова Н.П. Заповедные места Свердловской области. Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1984. 160 с.
3. Атомно-эмиссионное с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционное с электротермической атомизацией определение тяжёлых металлов и форм их нахождения в водах и донных отложениях водохранилищ / Э.М.Седых, Н.П.Старшинова, Л.Н.Банных, Е.Ю.Ершова, Е.В.Веницианов // Журн. аналит. химии, 2000. Т.55, №4. С.385-391.
4. ИП 16.348-98. Инструкция предприятия. Методы отбора проб объектов окружающей среды. Новоуральск, УЭХК, инв. № 16/4624, 1998.
5. ELAN 6000. Масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой. Руководство по программному обеспечению. Perkin-Elmer Sciex Instruments. 71 Four Valley Drive, Concord, Ont. Can. L4K 4V8. Номер по каталогу Perkin-Elmer: 0993-8968 Rev. F.
6. ИП 16.484-98. Инструкция предприятия. Подготовка к анализу проб объектов окружающей среды, выбросов и сбросов подразделений комбината для определения содержания урана, альфа-излучающих нуклидов, тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ". Новоуральск, УЭХК, инв. № 16/4580, 1998.
7. ИП 16.566-98. Инструкция предприятия. Методика выполнения измерений массовых концентраций металлов и неметаллов в питьевых, природных и очищенных сточных водах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Новоуральск, УЭХК, инв. № 16/5076, 1999.
8. ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические правила и контроль за качеством. М.: Изд-во стандартов, 1993. 8 с.
9. СанПин 2.1.4.559-96. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы. М.: Минздрав РФ, 1996. 74 с.
10. Ярошевский А.А. Кларки гидросфер // Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. С.7-14.
11. Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы. М.: Наука, 1991. 243 с.
12. Ветров В.А. Микроэлементы в природных средах региона оз. Байкал. Обоснование мониторинга. Дис. ... д-ра геолого-минералогических наук. М., 1996. 309 с.
13. Матвеев А.А., Аниканов А.М. Микроэлементы озера Байкал. Круговорот вещества и энергии в водоёмах. Гидрохимия и качество вод // IV Лимнологическое совещание: Тез. докл. Лиственичное-на-Байкале, 1977. С.91.
14. Определение макроэлементов в Байкальской воде методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой / В.Н.Эпов, И.Е.Васильева, В.И.Ложкин, Е.Н.Эпова, Л.Ф.Парадина, А.Н.Сутурин // Журн. аналит. химии. 1999. Т.54, №9. С.943-948.
15. Определение микроэлементов в Байкальской воде методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой / В.Н.Эпов, И.Е.Васильева, А.Н.Сутурин, В.И.Ложкин, Е.Н.Эпова // Журн. аналит. химии. 1999. Т.54, №11. С.1170-1175.
16. Никаноров А.М., Жулидов А.В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 311 с.
17. Формы нахождения металлов в воде и донных отложениях Увельдского водохранилища / С.А.Царёва, Т.А.Чеснокова, В.И.Гриневич и др // Водные ресурсы, 1999. Т.26, №3. С.71-76.
18. Даувальтер В.А. Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озёр // Водные ресурсы, 2000. Т.27, №4. С.469-476.
19. Зырин Н.Г., Стоилов Г.Н. // Агрохимия. 1965. №6. С.119.
20. ИП 16.602-2000. Инструкция предприятия. Методика выполнения измерений массовых концентраций элементов в почвах, донных отложениях и растительных объектах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Новоуральск, УЭХК, 2001.
21. Геохимия современной седиментации оз. Байкал / В.Д.Пампура, М.И.Кузьмин, А.Н.Гвоздков и др. // Геология и геофизика. 1993. №10-11. С.52-66.
22. Линник П.П., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 270 с.

* * * * *